

다중권선 변압기를 이용한 능동형 셀 밸런싱 회로에서 밸런싱 전류 전달 효율을 높이기 위한 변압기 설계 방안

이상중¹, 김명호², 백주원², 정지훈[†]

Transformer Design Methodology to Improve Transfer Efficiency of Balancing Current in Active Cell Balancing Circuit using Multi-Winding Transformer

Sang-Jung Lee¹, Myoung-Ho Kim², Ju-Won Baek², and Jee-Hoon Jung[†]

Abstract

This paper proposes a transformer design of a direct cell-to-cell active cell balancing circuit with a multi-winding transformer for battery management system (BMS) applications. The coupling coefficient of the multi-winding transformer and the output capacitance of MOSFETs significantly affect the balancing current transfer efficiency of the cell balancing operation. During the operation, the multi-winding transformer stores the energy charged in a specific source cell and subsequently transfers this energy to the target cell. However, the leakage inductance of the multi-winding transformer and the output capacitance of the MOSFET induce an abnormal energy transfer to the non-target cells, thereby degrading the transfer efficiency of the balancing current in each cell balancing operation. The impacts of the balancing current transfer efficiency deterioration are analyzed and a transformer design methodology that considers the coupling coefficient is proposed to enhance the transfer efficiency of the balancing current. The efficiency improvements resulting from the selection of an appropriate coupling coefficient are verified by conducting a simulation and experiment with a 1 W prototype cell balancing circuit.

Key words: Active cell balancing, Cell balancing techniques, Multi-winding transformer, BMS(Battery Management System), Balancing current transfer efficiency

1. 서 론

최근 신재생 에너지 발전 및 분산 전원 시스템의 활용이 늘어남에 따라 전원 계통의 안정성 향상을 위해 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)의 사용이 늘어나고 있다. 대표적인 ESS의 저장 요소로 배터리가 가장 많이 이용되며, 특히 에너지 밀도 및 전력 밀도가 우수한 리튬 이온 배터리가 주로 사용이 된다. 그런데 리튬 이온 배터리는 그 화학적인 특성 때문에 항상

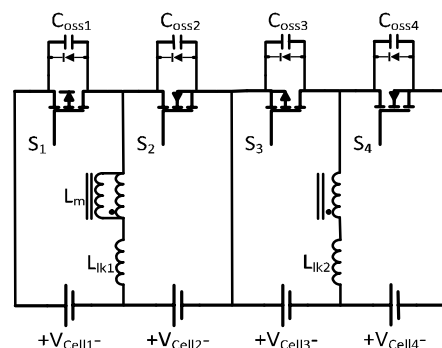


Fig. 1. Active cell balancing circuit using a multi-winding transformer.

배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)이 함께 연동되어 사용된다. 리튬 이온 배터리가 정해진 동작 범위 내에서 운전이 되도록 BMS가 배터리의 상태를 감시 및 제어하는데, 이러한 BMS의 기능 중 한 가지로 셀 밸런싱을 꼽을 수 있다.

Paper number: TKPE-2018-23-4-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jhjung@unist.ac.kr,
School of Electrical & Computer Engineering, UNIST
Tel: +82-52-217-2140 Fax: +82-52-217-2109

¹ School of Electrical & Computer Eng., UNIST

² Power Conversion and Control Research Center, HVDC
Research Division, KERI

Manuscript received Jan. 12, 2018; revised Jan. 23, 2018;
accepted Mar. 19, 2018

일반적으로 리튬이온 배터리의 단일 셀은 3.4~3.7 V의 공칭 전압을 가진다. 따라서 높은 전압이 요구되는 부하 측에 전력을 원활하게 공급하기 위하여 다수의 셀이 직렬로 연결되어 모듈 형태로 사용이 된다. 여러 셀이 직렬로 연결된 경우 각 셀에 동일한 전류가 흐르기 때문에 여러 주기에 걸쳐 충 방전을 수행하더라도 각 셀에 저장된 에너지량은 이상적으로 동일하다. 하지만 셀을 제조하는 과정에서 발생하는 셀 내부의 화학적 특성의 불균형과 사용 환경에 의해 발생하는 셀의 내부 변화로 모듈에 동일한 에너지가 충, 방전 되더라도 셀 간 전압차가 발생하게 된다^[1]. 셀 간 전압차가 발생된 후 반복적으로 충, 방전을 수행할 시 셀 간의 불균형은 더욱 심해지게 되어 최악의 경우 특정 셀이 과 충전 혹은 과 방전 상태에 노출된다. 이는 셀의 수명과 성능을 저하시키는 주요 원인이며 심할 경우 셀의 형태가 변하거나 화재의 위험을 가져올 수 있다. 이러한 위험을 막기 위하여 직렬로 연결된 셀이 모두 동일한 에너지를 갖게 하는 셀 밸런싱 기술이 다양하게 연구되었다. 셀 밸런싱 기술은 크게 수동 방식과 능동 방식으로 나눌 수 있다^[2].

수동 방식은 상대적으로 높은 전압을 가진 셀의 에너지를 저항으로 소모하는 방식이며, 회로 구성이 간단하다는 장점을 가지고 있다^[3]. 하지만 불균형이 발생할 때마다 보다 높은 전압을 가진 셀들의 에너지를 모두 소비시켜 시스템의 에너지 효율을 떨어뜨리는 단점이 있다. 또한 저항에서 발생하는 열로 인해 주변회로 동작에 영향을 줄 수 있기 때문에 방열 시스템이 필요할 수도 있다.

이러한 수동 방식의 단점을 보완하기 위한 방식으로 제안된 셀 밸런싱 기술이 능동 방식이다. 능동 방식은 비교적 높은 전압을 가진 셀의 에너지를 가장 낮은 전압을 갖는 셀에 전달하여 밸런싱을 수행한다. 따라서 수동 방식보다 에너지 효율이 높다는 장점을 가진다. 능동 방식에서는 커패시터 또는 인덕터와 같은 에너지 저장 요소를 사용하여 밸런싱을 수행한다. 커패시터를 이용한 밸런싱 회로는 밸런싱 전류가 셀 간 전압 차에 의해 제한되기 때문에 셀 간 전압 차이가 작을수록 밸런싱의 속도가 크게 감소하게 된다^{[4],[5]}. 또한 돌입 전류를 방지하기 위하여 저항이 사용되어 회로의 효율이 저하되는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 인덕터를 이용한 밸런싱 회로는 셀 간 전압 차에 의해 발생하는 밸런싱 속도 저하의 문제가 없으며 저항과 같은 수동 소자를 제거함으로써 회로의 효율을 높일 수 있는 장점이 있다^[6]. 하지만 인접하지 않은 셀 간 밸런싱을 수행할 경우 에너지가 여러 셀을 걸쳐 전달되기 때문에 밸런싱 속도가 감소하는 단점을 가지고 있다.

이 단점을 해결하기 위해 셀 간 직접(direct cell-to-cell) 에너지를 전달하여 밸런싱을 수행할 수 있는 회로에 대한 연구가 수행되었다^[7]. 그림 1은 다중 권선 변압기를 사용하는 방식을 나타낸다. 임의의 셀에 저장된 에너지를 변압기에 저장하여 목표 셀에 전달하는 방식으로 밸

런싱을 수행하며 목표 셀의 위치에 따라 회로는 플라이백 또는 벡-부스트 동작으로 선택적으로 에너지를 전달한다. 이 밸런싱 회로는 셀 당 하나의 스위치가 사용되고 두 셀이 하나의 변압기 권선을 공유하여 다른 셀 간 직접 밸런싱 회로에 비해 사용되는 수동 소자 및 능동 소자의 수가 적은 장점을 가진다. 그러나 [7]에서는 회로의 동작 특성이 자세히 분석되지 않았고 단순히 회로의 구조를 언급하는 데에 그쳤다.

본 논문에서는 그림 1의 자세한 동작 특성을 분석하고 회로 구성요소의 기생 성분에 의한 밸런싱 전류 전달 효율 저하 원인을 분석하였으며, 셀 밸런싱 과정 중 목표 셀에 효과적으로 밸런싱 전류를 전달하기 위한 다중 권선 변압기의 커플링 계수(k) 선정 방법을 제안하였다.

2. 동작 모드 분석

동작 모드의 분석에 앞서 다음과 같은 가정을 한다. 첫 번째, 다중권선 변압기의 커플링이 완벽하지 않아 누설 인덕턴스(L_{lk}) 성분이 존재 하며, 각 권선의 L_{lk} 는 동일하다. 두 번째, MOSFET의 도통 저항(R_{ds})은 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 세 번째, MOSFET은 모두 동일한 크기의 출력 기생 캐패시턴스(C_{oss})를 가진다. 네 번째, 셀 간의 전압 차이는 무시할 수 있을 정도로 작으며, 밸런싱 과정 중 셀의 전압이 일정하다. 마지막으로, 변압기의 권선이 2개일 경우에서 분석을 진행하였다.

본 논문에서는 목표 셀에 전달된 밸런싱 전류와 소스 셀에서 빠져나간 밸런싱 전류 비를 밸런싱 전류 전달 효율이라 정의한다. 밸런싱 전류 전달 효율이 높을수록 셀 밸런싱 속도가 빨라지며, 시스템 효율이 높아진다.

2.1 플라이백 동작

그림 2와 3은 셀 밸런싱 회로가 플라이백 동작을 할 때 전류 경로와 각 모드의 등가회로를 각각 나타내고 있다. 각 모드에서 등가회로는 스위치 동작에 의해 발생하는 전류 경로만을 고려하여 밸런싱 회로를 간소하게 표현한 것이다. 그림 4는 주요 동작 파형을 나타내고 있다. 인접하지 않은 셀 간에 전압 밸런싱을 수행할 경우 회로는 플라이백으로 동작한다. 소스 셀과 목표 셀은 각각 셀 1과 셀 4로 설정 하고 분석을 진행하였다. 또한 각 권선에 흐르는 전류는 그림 3에 나타난 각 모드의 등가 회로를 바탕으로 각 권선의 L_{lk} 의 관점에서 유도하였다.

모드 1 [t_0 - t_1]: 셀 1의 에너지를 변압기의 자화 인덕턴스(L_m)에 저장하기 위하여 S_I 를 턴-온 한다. 이때 에너지는 L_m 뿐만 아니라 L_{lk} 에도 저장이 된다. 이 구간에서 권선 1(L_I)에 흐르는 전류 i_{L_I} 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{L_I}(t) = \frac{V_{Cell1}}{L_{lk} + L_m}(t - t_0). \quad (1)$$

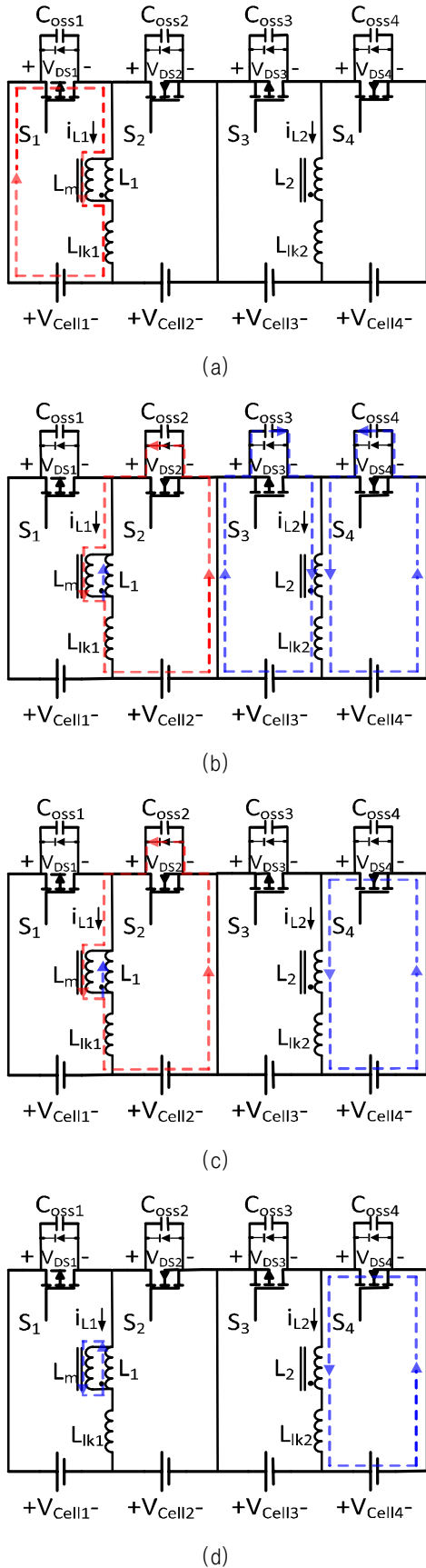


Fig. 2. Current path of circuit in flyback operation : (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

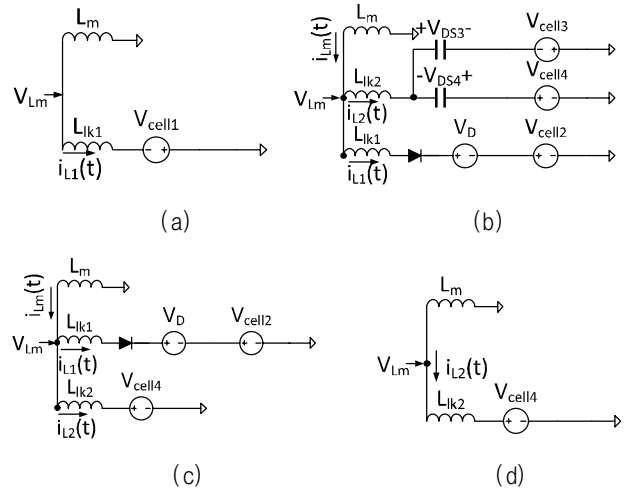


Fig. 3. Equivalent circuit in flyback operation : (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

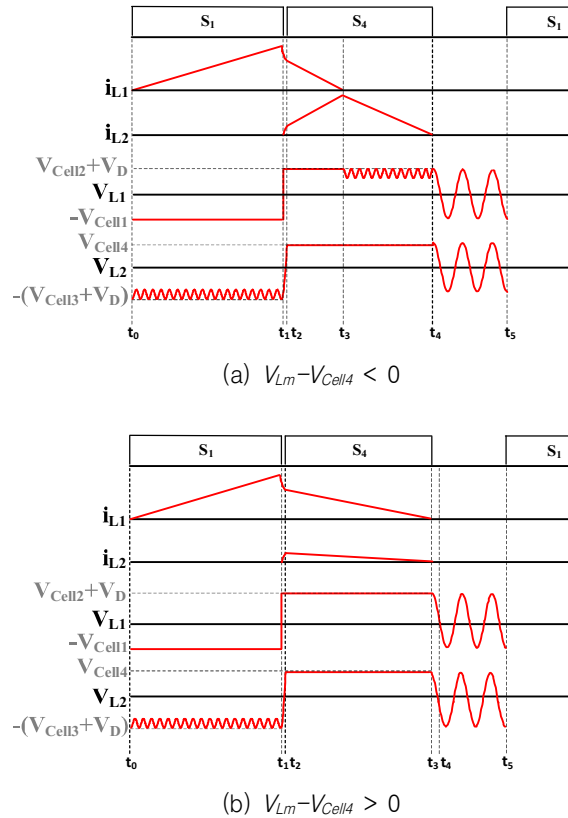


Fig. 4. Key waveform in flyback operation.

모드 2 [t₁-t₂]: S₁이 턴-오프 되고 S₄가 턴-온이 되기 전에 S₁과 S₄가 동시에 턴-온 되지 않도록 데드 타임을 가진다. S₁가 턴-오프 되면 L_m에 저장된 에너지가 C_{oss3}, C_{oss4}를 각각 충전 및 방전하기 시작한다. 이 구간에서의 전류 변화는 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{L1}(t) = i_{L1,t1} - (2V_{Cell} + V_D) \sqrt{\frac{2C_{oss}}{nL_{lk}}} \sin\left(\frac{(t_0 - t_1)}{\sqrt{2nL_{lk}C_{oss}}}\right) \quad (2)$$

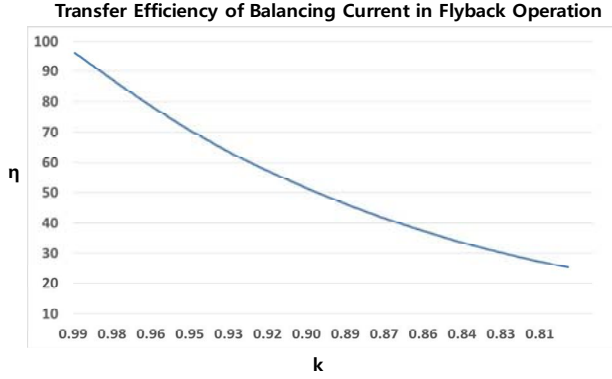


Fig. 5. Transfer efficiency of balancing current in flyback operation.

$$i_{L2}(t) = (2V_{Cell} + V_D) \sqrt{\frac{2C_{oss}}{nL_{lk}}} \sin\left(\frac{(t_0 - t_1)}{\sqrt{2nL_{lk}C_{oss}}}\right), \quad (3)$$

여기서 V_D 는 MOSFET의 바디 다이오드의 순방향 도통 전압이며, n 은 권선 수, 전류 i_{L2} 는 권선 $2(L_2)$ 에 흐르는 전류를 나타낸다.

모드 3 [t_2-t_3]: C_{oss3} , C_{oss4} 가 각각 충전 및 방전이 완료되면 S_4 는 턴-온 된다. 전류 i_{L2} 는 S_4 를 통해 전류가 흐르며, 전류 i_{L1} 은 S_2 의 바디 다이오드(D_2)를 통해 전류가 흐르게 된다. 모드 2와 모드 3에 발생하는 i_{L1} 의 전류 경로는 비-목표 셀에 전달되는 전류 경로로써, 이 경로로 흐르는 전류는 목표하지 않은 셀로 전달된다. 이 구간에서 각 전류공식은 식 (4)와 식 (5)로 표현할 수 있으며 모드 3 구간이 증가할수록 플라이백 동작의 밸런싱 전류 전달 효율은 감소한다.

$$i_{L1}(t) = i_{L1,t2} + \left(\frac{V_{Lm} - V_{Cell2} - V_D}{L_{lk1}}\right)(t - t_2), \quad (4)$$

$$i_{L2}(t) = i_{L2,t2} + \left(\frac{V_{Lm} - V_{Cell4}}{L_{lk2}}\right)(t - t_2), \quad (5)$$

여기서 V_{Lm} 은 모드 3에서 L_m 에 인가되는 평균 전압으로써 그림 3 (c)를 이용하여 구할 수 있으며, 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{Lm} = \left(\frac{V_{Cell2} + V_{Cell4} + V_D}{L_{lk} + 2L_m}\right)L_m. \quad (6)$$

여기서 i_{L1} 과 i_{L2} 의 전류 기울기는 V_{Lm} 과 V_{Cell4} 의 전압 차에 의해 결정이 된다. 그림 4의 (a), (b)는 $V_{Lm} - V_{Cell4} < 0$ 인 경우와, $V_{Lm} - V_{Cell4} > 0$ 인 경우를 각각 나타내고 있다. $V_{Lm} - V_{Cell4} > 0$ 인 경우 전류 i_{L1} 과 i_{L2} 의 기울기가 크게 감소하기 때문에 비-목표 셀에 전달되는 전류량이 증가하게 된다. 따라서 식 (6)을 통해 L_{lk} 가

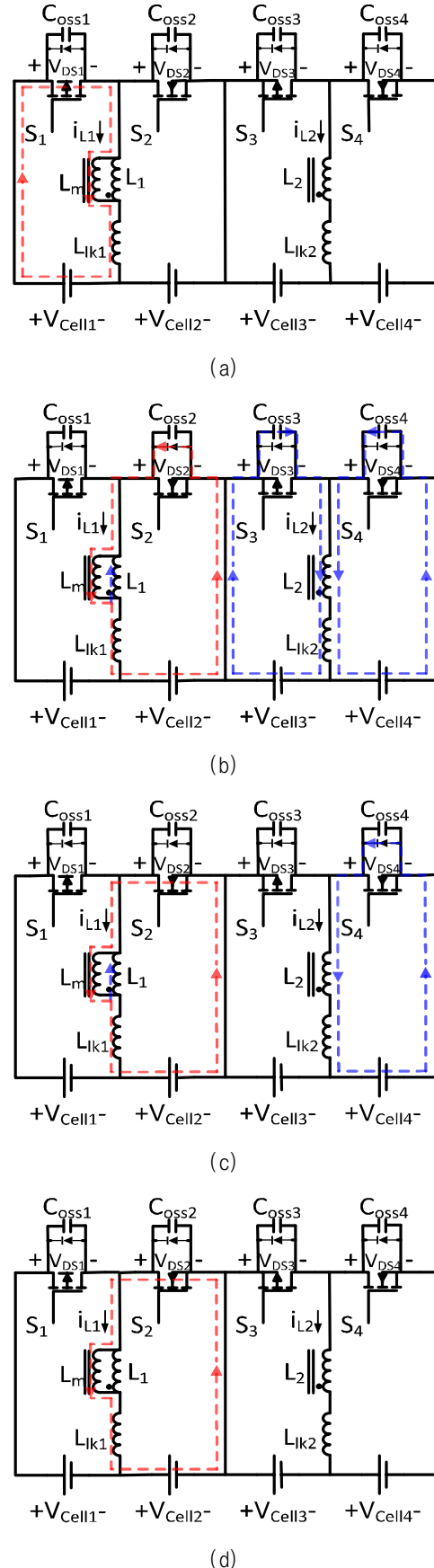


Fig. 6. Current path of circuit in buck-boost operation : (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

증가할수록 비-목표 셀에 전달되는 전류량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 5는 변압기의 커플링 계수에 따른 밸런싱 전류 전달 효율을 나타내고 있으며, 식 (1)~식 (8)을 이용하여 소스 셀에서 방전된 전류와 목표 셀로 전달된 전류를 계산하여 두 전류의 비로 표현되었다. C_{oss} 는 300 [pF]로 가정하였다.

모드 4 [t_3-t_4]: 전류 i_{L1} 이 0으로 감소하면 모드 4가 시작 된다. 이 구간에서 L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀에 전달되게 된다. 이 구간에서 i_{L2} 는 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$i_{L2}(t) = i_{L2,t3} - \frac{V_{Cell4}}{L_{lk2} + L_m}(t - t_3). \quad (7)$$

모드 5 [t_4-t_5]: L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀로 전달이 된 후 다음 스위칭 주기 전까지 L_m 과 C_{oss} 에 의해 공진이 발생한다.

2.2 벡-부스트 동작

그림 6은 셀 밸런싱 회로가 벡-부스트 동작을 할 때 전류 경로를 나타내고 있으며 그림 7은 모드 3과 모드 4의 벡-부스트 등가회로를 나타내고 있다. 모드 3과 모드 4를 제외한 나머지 등가회로는 플라이백과 동일하여 생략하였다. 그림 8은 주요 동작 파형을 나타내고 있다. 인접한 셀 간에 전압 밸런싱을 수행할 경우 회로는 벡-부스트로 동작한다. 소스 셀과 목표 셀은 각각 셀 1과 셀 2로 가정하여 분석을 진행하였다.

모드 1 [t_0-t_1]: 셀 1의 에너지를 L_m 에 저장하기 위하여 S_1 을 턴-온 한다. 플라이백 동작 모드 1과 해석이 동일하며, 이 때 i_{L1} 은 식 (1)로 표현될 수 있다.

모드 2 [t_1-t_2]: S_1 과 S_2 를 각각 동시에 턴-온, 턴-오프할 경우 암-쇼트(arm-short) 위험이 발생할 수 있으므로 데드 타임 구간이 필요로 한다. 데드 타임동안 타 권선으로 전달되는 에너지가 발생하게 된다. 이 모드의 해석은 플라이백 동작 모드 2와 동일하며, 각 전류 공식은 식 (2)과 식 (3)으로 표현할 수 있다. 모드 2에서 발생하는 전류 i_{L2} 의 크기는 비-목표 셀에 전달되는 전류의 초기 값을 결정하기 때문에 플라이백 동작과 달리 높은 커플링 계수와 C_{oss} 는 벡-부스트의 밸런싱 전류 전달 효율을 저하시킨다.

모드 3 [t_2-t_3]: C_{oss3} , C_{oss4} 가 각각 충전 및 방전이 완료되면 S_2 는 턴온 된다. 전류 i_{L2} 는 S_4 의 바디 다이오드(D_4)를 통해 전류가 흐르며, 전류 i_{L1} 은 S_2 를 통해 전류가 흐르게 된다. 이 구간에서 전류는 식 (8)과 (9)로 표현할 수 있다.

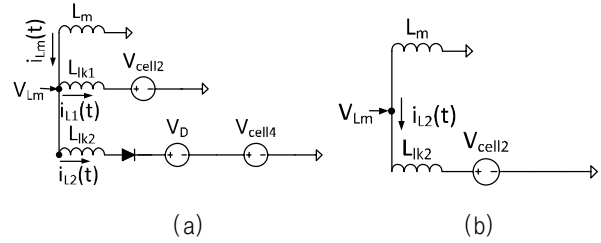


Fig. 7. Equivalent circuit of mode 4 in buck-boost operation : (a) Mode 3, (b) Mode 4.

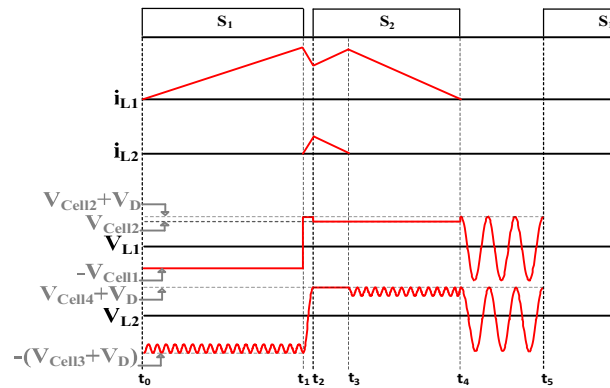


Fig. 8. Key waveform in buck-boost operation.

$$i_{L1}(t) = i_{L1,t2} + \frac{(V_{Lm} - V_{Cell2})}{L_{lk1}}(t - t_2), \quad (8)$$

$$i_{L2}(t) = i_{L2,t2} + \frac{(V_{Lm} - V_D - V_{Cell4})}{L_{lk2}}(t - t_2), \quad (9)$$

여기서 V_{Lm} 은 모드 3에서 L_m 에 인가되는 평균 전압으로 그림 7 (a)에서 구할 수 있으며, 플라이백 모드 3의 식 (6)과 같다. 그림 9는 벡-부스트 동작에서 밸런싱 전류 전달 효율 그래프를 나타내고 있다. 밸런싱 전류 전달 효율은 변압기의 커플링 계수의 함수이며, C_{oss} 는 300 [pF]로 가정하였다. 플라이백 동작과 달리 커플링 계수가 높아질수록 밸런싱 전류 전달 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

모드 4 [t_3-t_4]: i_{L2} 가 0으로 감소하게 되면 모드 4가 시작되며 이 구간에서 L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀에 전달되게 된다. 전류 i_{L1} 공식은 식 (10)으로 표현할 수 있다.

$$i_{L1}(t) = i_{L1,t3} - \frac{V_{Cell2}}{L_{lk} + L_m}(t - t_3). \quad (10)$$

모드 5 [t_4-t_5]: L_m 에 저장된 에너지가 모두 목표 셀로 전달이 된 후 다음 스위칭 주기 전까지 L_m 과 C_{oss} 에 의해 공진이 발생한다.

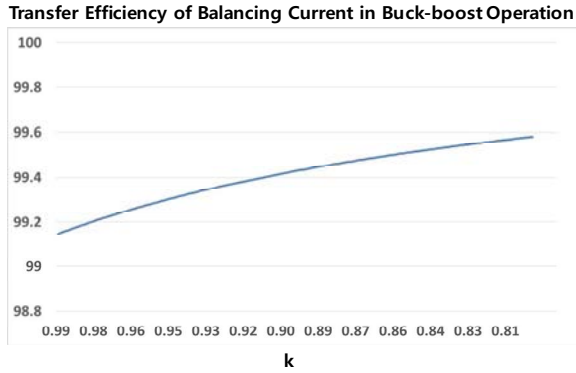


Fig. 9. Transfer efficiency of balancing current in buck-boost operation.

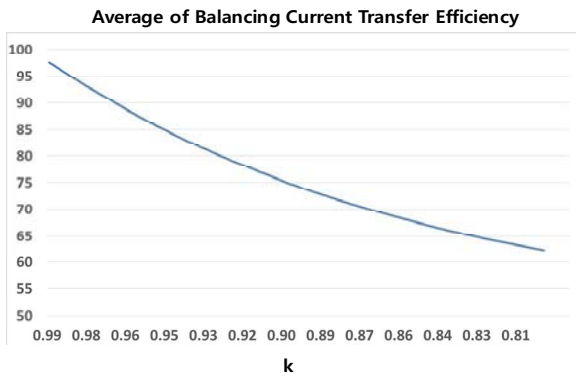


Fig. 10. Average of balancing current transfer efficiency.

2.3 다중권선 변압기의 커플링 계수 선정

셀 밸런싱 수행 중 플라이백 동작에서는 커플링 계수가 클수록 밸런싱 전류 전달 효율이 증가하며, 반대로 벅-부스트 동작에서는 커플링 계수가 증가함에 따라 밸런싱 전류 전달 효율이 감소한다. 커플링 계수에 따른 밸런싱 전류 전달 효율의 영향은 상대적으로 벅-부스트 동작보다 플라이백 동작에서 크게 나타난다. 셀 밸런싱 동작은 직렬로 연결된 셀 간에 무작위로 발생하는 전압 편차에 따라 동작하기 때문에 두 가지 동작이 동일한 확률로 발생한다. 따라서 두 동작의 밸런싱 전류 전달 효율 평균이 최대가 되도록 회로를 설계하는 것이 바람직하다. 그림 10은 각 동작 밸런싱 전류 전달 효율의 평균값을 나타내고 있다. 커플링 계수의 영향이 벅-부스트 동작보다 플라이백 동작의 전달 효율에 크게 영향을 미치기 때문에 선택적으로 에너지를 전달하기 위해서는 커플링 계수가 높아지도록 변압기를 설계하는 것이 셀 밸런싱 동작에 유리하다.

3. 셀 밸런싱 시뮬레이션 결과

그림 11과 그림 12는 각각 커플링 계수가 0.95 일 때 플라이백, 벅-부스트 전류 파형을 나타내고 있으며 그림 13과 그림 14는 커플링 계수가 0.98 일 때 플라이백 및 벅-부스트 전류 파형을 나타내고 있다. 커플링 계수가

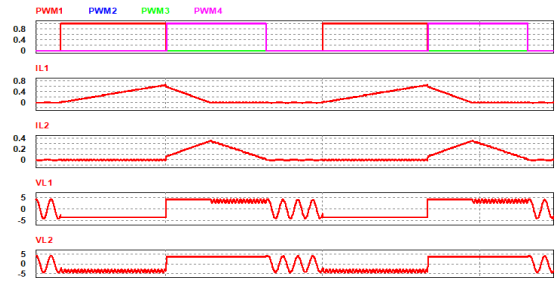


Fig. 11. Simulation result in flyback operation : k = 0.95.

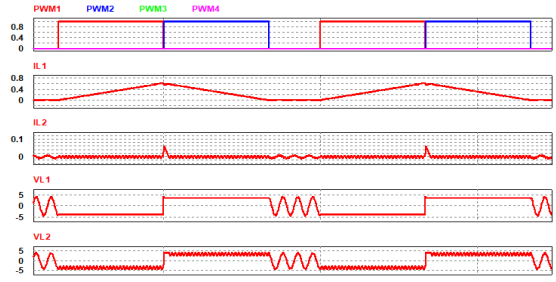


Fig. 12. Simulation result in buck-boost operation : k = 0.95.

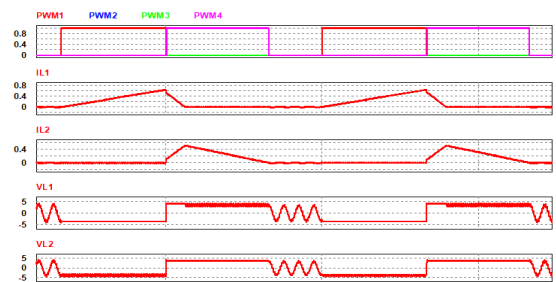


Fig. 13. Simulation result in flyback operation : k = 0.98.

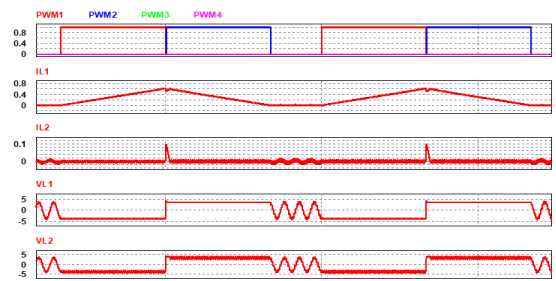


Fig. 14. Simulation result in buck-boost operation : k = 0.98.

TABLE I
EXPERIMENT CONDITION

Parameter	Value	
Nominal cell voltage	3.7 [V]	
V_D	0.8 [V]	
f_{sw}	30 [kHz]	
L_s	78 [uH]	
L_m	k = 0.98	76.44 [uH]
	k = 0.95	74.1 [uH]
L_{lk}	k = 0.98	1.56 [uH]
	k = 0.95	3.9 [uH]
C_{oss}	300 [pF]	

TABLE II
EXPERIMENT RESULT OF FLYBACK OPERATION

Flyback operation			
Parameter		Value	Transfer efficiency
k = 0.95	I_{L1_charge}	113 [mA]	69%
	$I_{L1_non-target}$	35 [mA]	
k = 0.98	I_{L1_charge}	123.7 [mA]	89%
	$I_{L1_non-target}$	12.5 [mA]	

TABLE III
EXPERIMENT RESULT OF BUCK-BOOST OPERATION

Buck-boost operation			
Parameter		Value	Transfer efficiency
k = 0.95	I_{L1_charge}	113 [mA]	99 %
	$I_{L2_non-target}$	0.72 [mA]	
k = 0.98	I_{L1_charge}	123.7 [mA]	98.8 %
	$I_{L2_non-target}$	1.44 [mA]	

0.95 일 경우 벅-부스트 동작에서 대부분의 에너지가 목표 셀에 전달된다. 하지만 플라이백 동작에서는 변압기에 저장된 에너지의 31 %가 목표하지 않은 셀에 전달되기 때문에 선택적으로 에너지를 전달하기에는 다소 한계가 있다. 반면 커플링 계수가 0.98일 때 플라이백 동작에서 목표하지 않은 셀에 전달되는 에너지양은 약 11 %며 전 조건보다 목표 셀에 에너지를 효과적으로 전달할 수 있다. 이 경우에 벅-부스트 모드 또한 약 99%의 밸런싱 전류 전달 효율을 갖기 때문에 두 동작에서 모두 효과적으로 셀 밸런싱을 수행할 수 있다.

4. 실험 결과

4.1 밸런싱 전류 전달 효율

표 1은 실험 조건을 나타내고 있으며 매개 변수는 시뮬레이션과 동일 값을 가진다. 그림 15와 그림 16은 각각 커플링 계수가 0.95 일 때 플라이백, 벅-부스트 전류 파형을 나타내고 있으며 그림 17과 그림 18은 커플링 계수가 0.98 일 때 플라이백 및 벅-부스트 전류 파형을 나타내고 있다. 실험 결과 커플링 계수에 따른 밸런싱 전류 전달 효율의 영향이 벅-부스트 동작보다 상대적으로 플라이백 동작에서 크게 나타나는 것을 확인 하였다. 표 2, 3은 커플링 계수에 따른 실험 결과를 나타내고 있다. 여기서 I_{L_charge} 는 변압기에 충전된 평균 전류이며, $I_{L_non_target}$ 는 비 목표 셀에 전달되는 평균 전류이다. 각 평균 전류는 오실로스코프에서 제공하는 평균값 계산 기능을 사용하여 측정된 값이다.

플라이백 밸런싱 전류 전달 효율의 경우 커플링 계수가 0.95 일 때 69 %의 전달 효율 가지며, 커플링 계수가 0.98일 경우 플라이백 동작에서 밸런싱 전류 전달 효율은

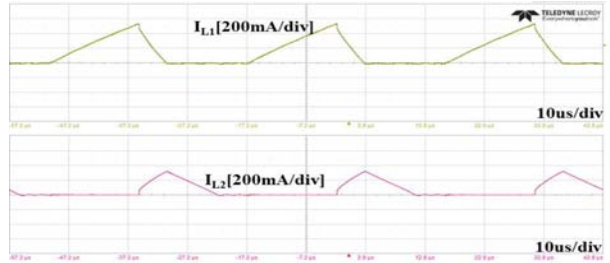


Fig. 15. Experiment result in flyback operation : k = 0.95.

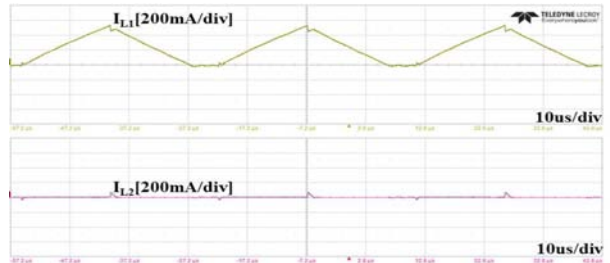


Fig. 16. Experiment result in buck-boost operation : k = 0.95.

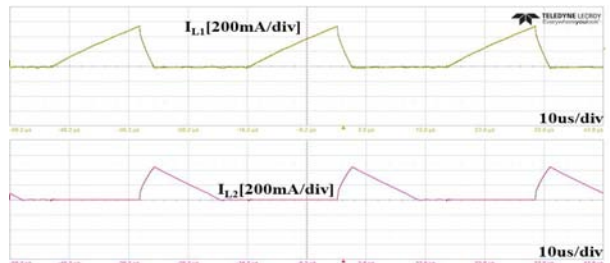


Fig. 17. Experiment result in flyback operation : k = 0.98.

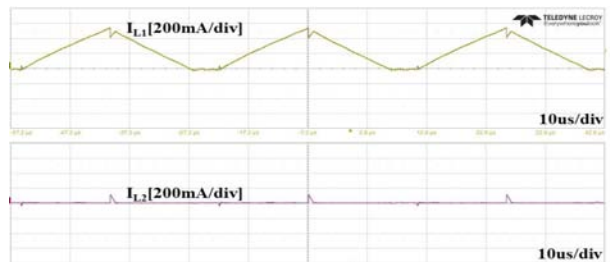
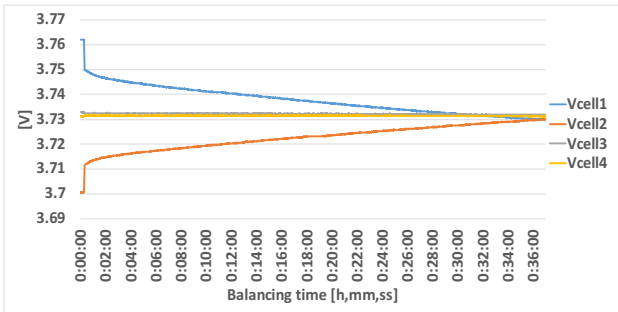
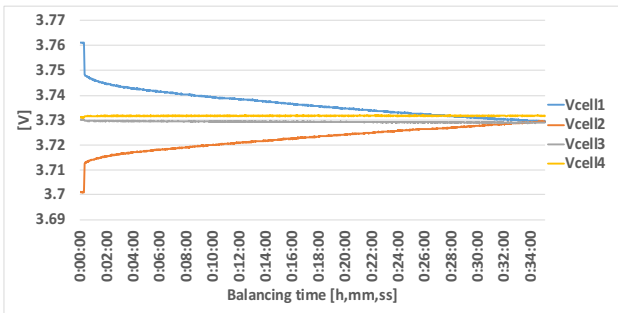
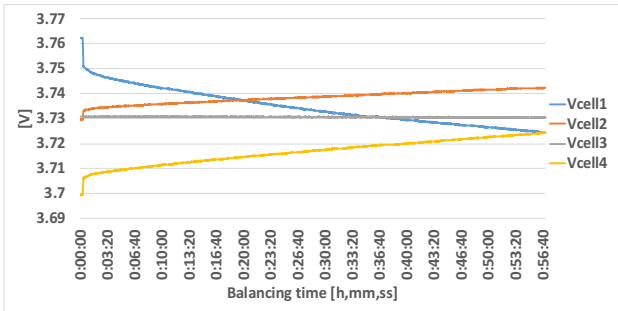
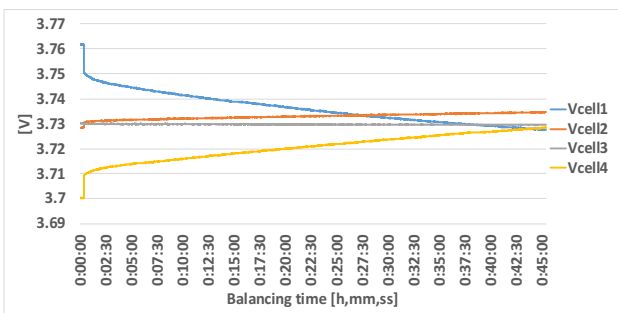


Fig. 18. Experiment result in buck-boost operation : k = 0.98.

전 조건보다 20 % 증가한 89 %의 전달 효율을 가진다. 벅-부스트의 경우 두 경우에서 약 99 %의 밸런싱 전류 전달 효율을 갖는다. 따라서 커플링 계수에 따른 밸런싱 전류 전달 효율의 영향이 큰 플라이백 동작에서 밸런싱 전류 효율을 높이는 것이 전체적인 밸런싱 전류 전달 효율을 증가시키는 것을 실험을 통해 확인하였다.

4.2 셀 밸런싱 테스트

그림 19에서 22까지는 각 동작에서 커플링 계수에 따른 셀 밸런싱 수행 결과를 나타내고 있다. 그림 19, 20은 밸런싱 전류의 실효값이 150mA 그리고 커플링 계수가 각각 0.95, 0.98일 때 벅-부스트 동작에서 밸런싱 결과를

Fig. 19. Cell balancing in buck-boost operation : $k = 0.95$.Fig. 20. Cell balancing in buck-boost operation : $k = 0.98$.Fig. 21. Cell balancing in flyback operation : $k = 0.95$.Fig. 22. Cell balancing in flyback operation : $k = 0.98$.

나타내고 있다. 커플링 계수가 0.95일 경우 소스 셀 (Cell1)의 초기 전압은 3.762 V이며, 커플링 계수가 0.98 일 경우 소스 셀(Cell1)의 초기전압은 3.7605V 이다. 목표 셀(Cell2)의 초기 전압은 3.7 V로 두 셀의 전압 차는 약 60 mV를 갖는다. 벅-부스트의 경우 두 커플링 계수에서 거의 동일한 전류 전달 효율을 갖기 때문에 거의 동일한 밸런싱 시간을 갖는다. 커플링 계수가 0.95일 경우

약 36분의 밸런싱 시간을 가지며, 0.98일 경우 약 34분의 밸런싱 시간을 가진다. 약 2분의 밸런싱 시간오차는 소스 셀(Cell1) 초기 전압 오차로 인해 발생하였다.

그림 20, 21은 밸런싱 전류의 실효값이 150mA 그리고 커플링 계수가 각각 0.95, 0.98일 때 플라이백 동작에서 밸런싱 결과를 나타내고 있다. 소스 셀(Cell1)과 목표 셀(Cell4)의 초기 전압 조건은 벅-부스트와 동일하다. 커플링 계수가 0.95일 경우 69%의 밸런싱 전류 전달 효율을 가지므로 셀 밸런싱 수행 과정 중 비-목표 셀(Cell2)의 전압이 약 18.6 mV 상승하게 된다. 또한 비-목표 셀에 전달되는 에너지로 인해 약 56분의 밸런싱 시간을 갖는다. 커플링 계수가 0.98일 경우 89%의 밸런싱 전류 전달 효율을 가지므로 셀 밸런싱 수행 과정 중 비-목표 셀 (Cell2)의 전압이 약 6 mV 상승하게 된다. 또한, 비-목표 셀에 전달되는 에너지가 커플링 계수가 0.95일 경우 보다 감소하여 11분이 단축된 45분의 밸런싱 시간을 갖는다. 따라서 높은 커플링 계수를 갖는 다중 권선 변압기를 사용하여 셀 밸런싱을 수행하는 것이 플라이백 및 벅-부스트 두 동작에서 높은 밸런싱 전류 전달 효율을 갖는 것을 셀 밸런싱 테스트를 통해 검증하였다.

5. 결 론

본 논문은 다중 권선 변압기를 사용한 셀 간 직접 밸런싱 회로의 자세한 동작 모드를 분석하고 회로의 제정수에 따른 밸런싱 전류 전달 효율을 해석적으로 도출하였다. 다중 권선 변압기의 커플링 계수 및 MOSFET의 출력 기생 캐패시턴스가 밸런싱 전류 전달 효율에 영향을 주는 것을 보여주었으며, 이를 고려하여 밸런싱 전류 전달 효율을 높일 수 있는 커플링 계수 선정 방법을 제안하였다. 커플링 계수 선정에 따른 밸런싱 전류 전달 효율 개선 효과는 시뮬레이션 및 실험으로 검증하였다.

이 논문은 2017년 동서발전 연구비(해수전지를 이용한 파일럿급 ESS 설비구축 원천기술개발 및 시험)에 의하여 연구되었음

References

- [1] J. Kim, J. Shin, C. Chun, and B. H. Cho, "Stable configuration of a li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing," *2012 IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, pp. 411-424, Jan. 2012.
- [2] M. Daowd, N. Omar, P. V. D. Bossche, and J. V. Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-7, Oct. 2011.

- [3] J. Qi and D. D. C. Lu, "Review of battery cell balancing techniques," in *Proceedings of the Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-6, Sep. 2014.
- [4] M. Y. Kim, C. H. Kim, J. H. Kim, D. Y. Kim, and G. W. Moon, "Switched capacitor with chain structure for cell-balancing of lithium-ion batteries," *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2994-2999, Dec. 2012.
- [5] C. Pascual and P. T. Krein, "Switched capacitor system for automatic series battery equalization," *Proc. IEEE 1997 Applied Power Electronics Conference*, pp. 848-854, Feb. 1997.
- [6] Z. Zhou, Y. Shang, B. Duan, and C. Zhang, "An any-cell(s)-to-any-cell(s) equalizer based on bidirectional inductor converters for series connected battery string," *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 2511-2515, Oct. 2016.
- [7] J. Xu, S. Li, C. Mi, Z. Chen, and B. Cao, "SOC based battery cell balancing with a novel topology and reduced component count," *Energies*, Vol. 6, pp. 2726-2740, May 2013.



이상중(李相中)

1990년 2월 12일생. 2015년 금오공과대 전자공학부 졸업. 2015년~현재 울산과학기술원(UNIST) 전기전자컴퓨터공학부 석박 통합과정.



김명호(金明浩)

1984년 1월 16일생. 2006년 한양대 전자 전기컴퓨터공학부 졸업. 2008년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2013년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2013년~2015년 삼성중공업 기전팀 근무. 2016년~현재 한국전기연구원 전력변환연구센터 선임연구원.



백주원(白周元)

1967년 1월 2일생 1990년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 202년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년 Virgini Tech 방문연구원. IEEE 정회원. 현재 한국전기연구원 HVDC연구본부 전력변환연구센터장. 당 학회 산학협동이사.



정지훈(鄭智勳)

1977년 3월 2일생. 2000년 포항공과대 전자전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2006년~2009년 삼성전자 프린팅사업부 책임연구원. 2009년~2010년 Texas A&M University at Qatar 박사후연구원. 2011년~2012년 한국전기연구원 선임연구원. 2013년~현재 울산과학기술원(UNIST) 전기전자컴퓨터공학부 부교수. 당 학회 기획이사. IEEE Senior Member.